

## МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ ОРГСТЕКЛА, ОБРАБОТАННОЙ ВЫСОКОНАПОРНОЙ ВОДНОЙ СТРУЕЙ (WATER JET TECHNOLOGY)

А.И. Свириденок, М.И. Игнатовский

Научно-исследовательский центр проблем ресурсосбережения НАНБ,  
пл. Тизенгауза, 7, 230023, г. Гродно, Беларусь, E-mail: resource@mail.grodno.by

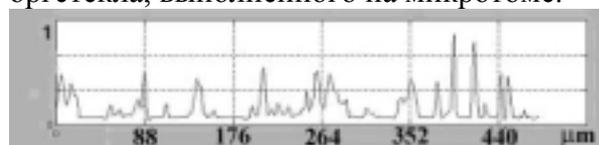
### ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрена возможность измерения физических характеристик полимерных поверхностей, предварительно обработанных высоконапорной водной струей (Water Jet Technology), методом индентирования. Water Jet Technology обладает рядом важных преимуществ перед использованием традиционных методов обработки твёрдых тел: достаточно высокую скорость обработки, отсутствие механического износа режущего инструмента и нагрева, а как следствие, и термических напряжений в обрабатываемом материале.

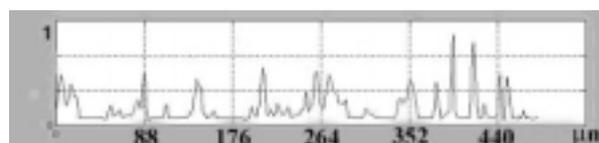
Известно большое количество фундаментальных и прикладных исследований высоконапорного воздействия водной струи на различные материалы: твёрдые металлы и покрытия на их основе, керамику, горные породы и т.д. [1-6]. Водоструйное разрушение полимерных материалов изучено в меньшей степени. До сих пор не выяснен, несмотря на многочисленные идеи и результаты исследований [7-9], тонкий механизм водоструйного изнашивания полимеров и его влияние на свойства поверхностного слоя.

### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве объектов исследования использовались образцы листового оргстекла (марка СЭ прозрачное ГОСТ 9784-75), поверхность которого была обработана методом Water Jet Technology в лаборатории Института материаловедения Ганноверского университета. Для получения профилограмм был применён профилометр–профилограф (тип А1, модель 252, радиус зонда 10 мкм, нагрузка 0.015 Н). Характерная профилограмма поверхности оргстекла приведена на рис. 1. На рис. 2. приведён микроскопический снимок среза поперёк полосы технологической обработки оргстекла, выполненного на микротоме.



a)



b)

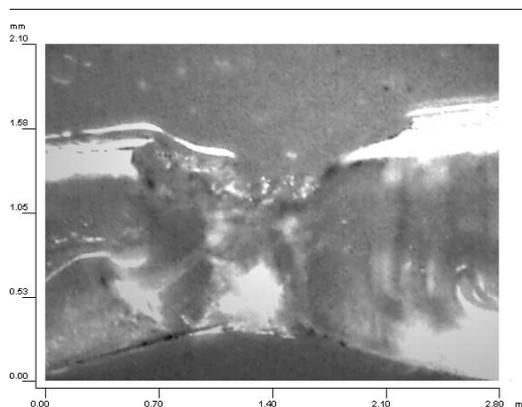


Рис. 1. Характерные профилограммы поверхности.

Рис 2. Срез оргстекла в зоне обработки.

Для индентации поверхности использовали устройство для испытания на микротвердость  $mhr$  160, смонтированное на микроскопе NU-2 фирмы "Карл Цейсс". Образцы оргстекла помещались под нагрузкой  $m=80$  г на время 60с при помощи цилиндрического индентора диаметром 1,5 мм. Проводили оценку деформируемости поверхности вдоль линии – базы замера, на расстоянии 1,5 мм от границы обработки (рис. 2). Также тестировалась необработанная поверхность оргстекла. Сечение по I-I обработанной поверхности имеет вид (см. рис. 3, 4).

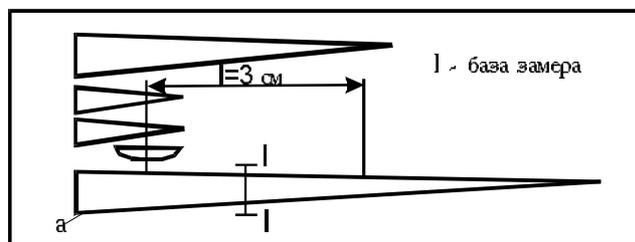


Рис. 3. Схема замера на образце.

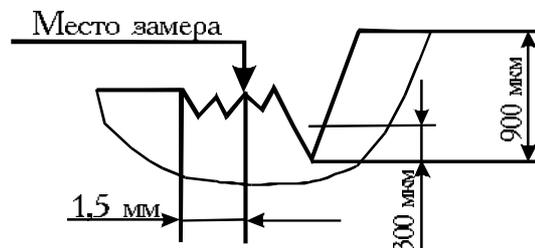


Рис. 4. Сечение образца.

Экспериментально определена глубина внедрения индентора  $\delta$  для необработанной поверхности  $5 \div 8$  мкм. Величина  $\delta$  по длине обработанной поверхности имеет среднее значение –  $13.8 \div 25.6$  мкм.

Значения параметров шероховатости, рассчитанные на основе профилограмм, лежат в пределах: среднее арифметическое отклонение  $Ra$   $18 \div 43$  мкм, характерный латеральный размер дефектов  $Sm$   $196 \div 683$  мкм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

### Выбор расчётной схемы и проверка адекватности модели пластического контакта

С ростом нагрузки в системе испытываемая поверхность — индентор наступает момент, когда хотя бы в одном из тел возникают пластические деформации. Поэтому, для адекватного моделирования контакта шероховатой поверхности и нагруженного сферического индентора, первоначально было проверено предположения о пластичности контакта. Рассчитано среднее напряжение на площадке контакта  $\sigma_{mid}$ . Условием достижения пластичного течения материала в зоне контакта сферического индентора с поверхностью является соотношение [10]:

$$\sigma_{mid} \geq 1.06\sigma_t, \quad (1)$$

где  $\sigma_t$  предел текучести.

$$\sigma_{mid} = \frac{2}{k} Hb \left( 2 \frac{\delta}{R} \right)^{\frac{n-2}{2}}; \quad (2)$$

$$k = n^2 (n-2)^{\frac{n-2}{2}} (n-1)^{1-n} \quad (3)$$

Использовалось выражение (2) зависимости  $\sigma_{mid}$  от углубления сферического индентора  $\delta$  диаметром  $D$  ( $R$  – радиус), где  $n$  принимает значения от 2 до 2.5.

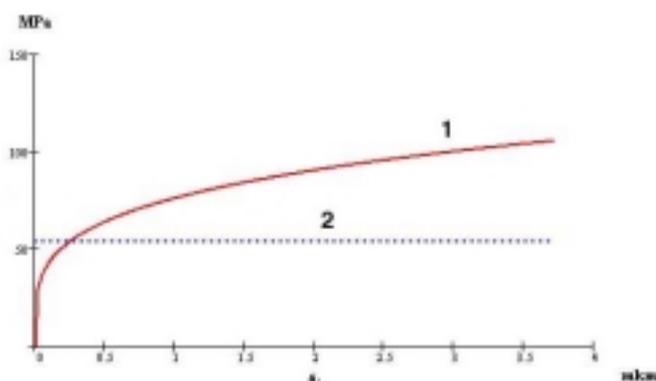


Рис. 4. Зависимость напряжения от глубины внедрения.

Из графика видно (рис. 4), что среднее напряжение быстро достигает и превышает уровень заданный выражением (1) уже при малых значениях внедрения шарового индентора, а следовательно и при малых нагрузках. Значение предела текучести для оргстекла показано на графике прерывистой прямой [11].

### Модель индентации гладкой поверхности оргстекла

Построены зависимости глубины внедрения индентора от величины нагрузки  $F$ . На графике (рис. 5) видны зависимости глубины внедрения:  $\delta_1$  – шарового,  $\delta_2$  – пирамидального и  $\delta_3$  – цилиндрического инденторов. Расчеты были произведены по формулам:

$$\delta = \left( \frac{3eF}{4R^{1/2}} \right)^{2/3}; \quad (4)$$

для шарового индентора используется формула Герца,

$$\delta = \left( \frac{\pi eF}{2tg\alpha} \right)^{1/2}; \quad (5)$$

для пирамидального индентора [12],

$$\delta = \frac{Fe}{2R}; \quad (6)$$

для цилиндрического индентора [13],

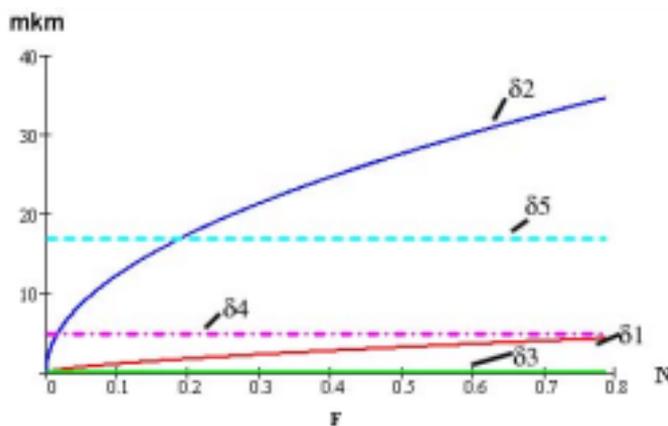


Рис. 5. Расчётные и экспериментальные зависимости глубины внедрения от нагрузки.

меньших значений, что может быть связано с наклоном основания штампа по отношению к нормали во время проведения эксперимента. В случае наклона на угол  $\alpha$ , давления на площадке контакта будут распределяться согласно выражения [13]:

$$P(x) = \frac{F}{\pi\sqrt{R^2 - x^2}} - \frac{\alpha x}{2e\sqrt{R^2 - x^2}}. \quad (7)$$

где  $e = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$ , приведенный

модуль упругости веществ,  $\alpha$  – половина угла при вершине конуса. Прямые прерывистые линии на графике (рис. 5) указывают средние экспериментальные значения глубины внедрения в необработанную –  $\delta_4$  и обработанную –  $\delta_5$  поверхность.

Видно, что экспериментальные значения лежат между кривыми  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . Теоретическая кривая  $\delta_3$ , цилиндрического индентора, находится в области значительно

**Модель контакта шероховатой поверхности оргстекла с идеально гладким цилиндрическим индентором**

При построении данной модели принимают допущение, что шероховатая поверхность состоит из сферических сегментов радиусом  $R$ , расположенном на жёстком основании. Внедрение индентора может происходить в пределах величины максимальной неровности поверхности  $R_{\max}$  [14, 15]. При выполнении расчётов важную роль играют безразмерные параметры опорной кривой профилограммы поверхности  $\nu$  и  $b$ , получаемые из соотношений:

$$\nu_{1,2} = \frac{\lg \frac{t_{0,1}}{t_{0,2}}}{\lg \frac{x_1}{x_2}}; \quad \nu_{1,3} = \frac{\lg \frac{t_{0,1}}{t_{0,3}}}{\lg \frac{x_1}{x_3}}; \quad \nu_{2,3} = \frac{\lg \frac{t_{0,2}}{t_{0,3}}}{\lg \frac{x_2}{x_3}}$$

$$b_{1,2} = 10^{\lg t_{0,1} - \nu \lg x_1}; \quad b_{1,3} = 10^{\lg t_{0,3} - \nu \lg x_3}; \quad b_{2,3} = 10^{\lg t_{0,2} - \nu \lg x_2}$$

$$\nu = \frac{\nu_{1,2} + \nu_{1,3} + \nu_{2,3}}{3}; \quad b = \frac{b_{1,2} + b_{1,3} + b_{2,3}}{3}$$

где  $x_{0,1} = 0.1$ ,  $x_{0,2} = 0.2$  и  $x_{0,3} = 0.3$  — уровни опорной кривой при относительном сближении, а  $t_{0,1}$ ,  $t_{0,2}$  и  $t_{0,3}$  — значения относительных длин профиля на данных уровнях.

Зная контурную площадь контакта  $A_c$ , относительное сближение тел получим из соотношения:

$$\varepsilon = \left( k1 \left( \frac{r}{R_{\max}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{F}{eA_c} \right)^{2\nu+1}; \quad (8)$$

где

$$k1 = \pi \frac{\Gamma(2\nu + 2)}{b} 2^{2\nu} (\Gamma(\nu + 1))^2; \quad (9)$$

Затем, исходя из подставляя полученное значение в выражение  $\delta = \varepsilon R_{\max}$  найдём сближение тел. В результате вычислений получен график зависимости углубления индентора в поверхность от нагрузки (рис. 6, пунктирная линия 2).

**Модель контакта шероховатых поверхностей оргстекла и цилиндрического индентора**

Исходными данными для расчёта модели являются: модуля Юнга и коэффициента Пуассона, микротвёрдость материала  $H$ , удельная поверхностная энергия  $\gamma$ , среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$ , максимальной неровности поверхности  $R_{\max}$ ,  $S_m$ ,  $S$  — средний шаг неровностей и местных выступов профиля соответственно [10]. Вычисляются средний радиус закругления вершин:

$$R = \frac{3}{16\sqrt{2}\pi^2} \frac{S_{m1}S_1S_{m2}S_2}{(R_{a1}^2S_{m2}^2S_2^2 + R_{a2}^2S_{m1}^2S_1^2)^{1/2}}; \quad (10)$$

и плотность выступов на единицу площади:

$$D = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \frac{(R_{a1}S_{m2}S_2)^2 + (R_{a2}S_{m1}S_1)^2}{(S_1S_2)^2((R_{a1}S_{m2})^2 + (R_{a2}S_{m1})^2)}; \quad (11)$$

среднеквадратичное отклонение профиля относительно линии шероховатости:

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{\pi}{2}(R_{a1}^2 + R_{a2}^2)}; \quad (12)$$

параметр шероховатости:

$$\alpha = \left( \frac{\sigma^* DR}{2.336 \cdot 10^{-2}} \right); \quad (13)$$

Так как отсчёт высот вершин ведётся от средней линии, а не от поверхности преобразуем  $\sigma^*$  к виду:

$$\sigma = \left( 1 - 0.8962/\alpha \right)^{\frac{1}{2}} \sigma^*; \quad (14)$$

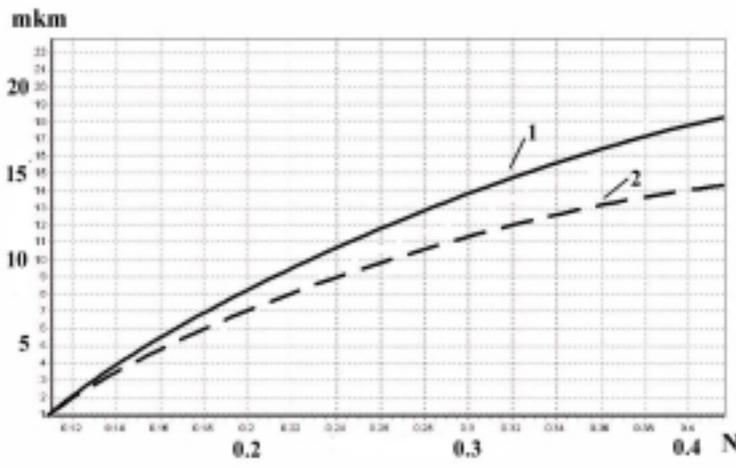


Рис. 6. Расчётные зависимости глубины внедрения от нагрузки. 1) шероховатая поверхность – шероховатая поверхность; 2) шероховатая поверхность – гладкая поверхность.

Исходя из адгезионного параметра

$$\Delta_c = \frac{3}{4} \frac{1}{\sigma R^{\frac{1}{3}}} \left( \frac{\pi R \Delta \gamma}{e^{-1}} \right)^{\frac{2}{3}}; \quad (15)$$

имеющего значение меньше 0.1, можно утверждать, что взаимодействие имеет неадгезионный характер.

Так как индекс пластичности  $\psi = \frac{3e^{-1}}{H} \sqrt{\frac{\sigma^*}{R}}$ , принимающий значение 35.369, продолжим расчёты по алгоритму пластичного контакта.

$$\delta = \frac{R_{\max}}{2} - \sigma h_{маб}. \quad (16)$$

где  $h_{маб}$  – табулированное значение уровня деформации контакта. В результате вычислений получен график зависимости углубления индентора в поверхность от нагрузки на поверхность (рис. 6).

## ВЫВОДЫ

На графиках (рис. 5, 6) приведены результаты полученные экспериментальным и расчётным способом. Показана зависимость увеличения величины внедрения индентора в поверхность оргстекла от обработки Water Jet Technology. Характер изменения кривизны кривых свидетельствует об уменьшении модуля упругости («разупрочнении» поверхностного слоя материала) при измерении на больших контурных площадях контакта.

Работа выполнена в рамках проекта № 268 программы INTAS “Wear of Fragile Coatings by High pressure Water Jet”.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bowden F.P. and Field J.E. Proc. Roy. Socx. (London), A282, 331 (1964)
2. F.J. Heymann. High-Speed Impact Between a Liquid Drop and a Solid Surface, Journal Applied Physics, v.10, Number 13 (1969)
3. Перельман Р.Г. Основы теории эрозионной прочности при каплеударном воздействии. Труды Московского авиационного института, вып. 245, 1972.
4. Shid Y., Sugimoto Y. Water Jet erosion behavior of Ti – Ni binary alloys. Wear, 146 (1991)
5. Louis H. Topics of Jetting Technology. New Application of Water Jet Technology. Ishinomaki, Japen, 1999
6. Бреннер В.А., Жабин А.Б., Пушкарёв А.Е., Щеголевский М.М. Гидромеханическое разрушение горных пород. М., 2000
7. Алексеев В.К., Бодрышев В.В., Денисов Ю.А., Перельман Р.Г. Экспериментальное исследование прочности при импульсных каплеударных нагружениях. Проблемы прочности. № 6, 1977
8. Briscoe V.J., Pickles M.J., Julian X.S., Adams M.J. Erosion of polymer – particle composite coating by liquid water jet. Wear. 203-204. 1997
9. Louis H, Milchers W., Pude E.: Study on the Removal of Brittle Polymers with Pure Water Jets. Proceeding of the 15-th Intern. Conf. On Jetting Technology. Poenneby, 2000
10. Свириденко А.И., Чижик С.А., Петроковец М.И. Механика дискретного фрикционного контакта. –Мн.: Навука і тэхніка, 1990. –272с.
11. Калинин Э.Л., Саковцева М.Б. Выбор пластмасс для изготовления и эксплуатации изделий: Справ. изд. Л.: Химия, 1987. 416 с.
12. Булычев С.И., Алехин В.П., Шоршоров М.Х., Терновский А.П. Исследование механических свойств материалов с помощью кинетической диаграммы нагрузка – глубина отпечатка при микровдавливании. Проблемы прочности. № 9, 1976 г., Киев, Наукова думка.
13. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1980. – 304 с.
14. В.А. Белый, А.И. Свириденко, М.И. Петроковец, В.А. Савкин Трение полимеров. «Наука», 1972, стр. 202.
15. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.А. Основы расчётов на трение и износ. М., «Машиностроение», 1977. 526 с.